

Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea

Álvaro Arango Ruíz¹ / Luis Fernando Garcés Giraldo²

Wastewater treatment from milk industries

Tratamento de águas residuais da indústria láctea

RESUMEN

Introducción. La industria láctea genera gran cantidad de aguas residuales, concentrando en estas la mayor cantidad de contaminantes originados en sus procesos. Las aguas residuales de la industria láctea se caracterizan por poseer una gran cantidad de materia orgánica, especialmente grasas y aceites, además de sólidos suspendidos y valores de pH que se salen de los rangos aceptables para vertimiento. La electrocoagulación es un proceso que se ha venido desarrollando en los últimos años y que se presenta como alternativa de tratamiento para las aguas residuales de esta industria, ofreciendo múltiples ventajas comparativas con las tecnologías tradicionales. **Objetivo.** Estudiar la aplicación de electrocoagulación como tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea. **Materiales y métodos.** Las aguas residuales de la industria láctea fueron tratadas por electrocoagulación empleando un diseño experimental factorial 3x2x3, que obedece a variaciones de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento, las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de DQO y grasas y aceites. **Resultados.** Las remociones de DQO fueron del orden del 94 % y la de grasas y aceites del orden del 99 % a pH ácido y a tiempo de tratamiento de 15 minutos. **Conclusión.** La electrocoagulación se vislumbra como un tratamiento eficiente para la remoción de contaminantes en las aguas residuales industriales, específicamente en el caso de la industria láctea como sucedió en esta investigación.

Palabras clave: Electrocoagulación. Celda tipo bach. Electrodo de hierro. Electroquímica.

¹ Ingeniero Químico. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Facultad de Ingenierías. Investigador grupo GAMA. Corporación Universitaria Lasallista/ ² Ingeniero Sanitario. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Ambiental. Director grupo de investigación GAMA. Decano Facultad de Ingenierías. Corporación Universitaria Lasallista.

ABSTRACT

Introduction. Milk industries generates lots of waste waters, accumulating in them the highest quantities of pollutants resulting from their processes. These waste waters content much organic matter, specially fat and oils. They also contain solid materials in suspension and pH values beyond acceptable rates for pouring. Electrocoagulation is a process that has been being developed in recent years and has been an alternative to treat waste waters from milk industries, offering many advantages when compared to traditional technologies. **Objective.** To study the application of electrocoagulation to treat waste waters from milk industries. **Materials and methods.** Waste waters were traeted with the electrocoagulation process by the use of an experimental factorial design 3X2X3, which obeys to pH variations, current density and treatment time. The response variables measured were removal percentages of COD, and fats and oils. **Results.** COD removals had a 94% value and fats and oils had a 99% measurement, at an acid pH and at a treatment time of 15 minutes. **Conclusion.** Electrocoagulation can be seen as an efficient treatment to remove pollutants from waste waters coming from industries, specifically from milk industries, like in the case of our research.

Key words: Electrocoagulation. Bach type cell. Iron electrode. Electrochemistry.

RESUMO

Introdução. A indústria láctea gera grande quantidade de águas residuais, concentrando nestas a maior quantidade de contaminantes originados em seus processos. As águas residuais da indústria láctea se caracterizam por possuir uma grande quantidade de matéria orgânica, especialmente gordurosas e azeites, além de sólidos suspensos e valores de PH que se saem das castas aceitáveis para vertimento. A electrocoagulação é um processo que veio desenvolvendo nos últimos anos e que se apresenta como alternativa de tratamento para as águas residuais desta indústria, oferecendo múltiplas vantagens comparativas com as tecnologias tradicionais. **Objetivo.** Estudar a aplicação de electrocoagulação como tratamento das águas residuais da indústria láctea. **Materiais e métodos.** As águas residuais da indústria láctea foram tratadas por electrocoagulação empregando um desenho experimental fatorial 3x2x3, que obedece a variações de PH densidade de corrente e tempo de tratamento, as variáveis de resposta medidas foram percentagens de remoção de DQO e gordurosas e azeites. **Resultados.** As remoções de DQO foram da ordem de 94 % e a de gorduras e azeites da ordem de 99 % a PH ácido e a tempo de tratamento de 5 minutos. **Conclusão.** A electrocoagulação se vislumbra como um tratamento eficiente para a remoção de contaminantes nas águas residuais industriais, especificamente no caso da indústria láctea como aconteceu nesta investigação.

Palavras chaves: Electrocoagulação. Cella tipo bach. Eletrodo de ferro. Eletroquímica.

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria en sus procesos debe utilizar grandes cantidades de agua de buena calidad que se requiere en los procesos de lavado, limpieza y desinfección; actividades que hacen de esta industria una de las de mayor generación de aguas residuales con altas cargas de contaminantes orgánicos¹⁻³.

Factores económicos, legislativos y ambientales, obligan a la industria de los alimentos a recurrir a estrategias conducentes a reducir tanto la cantidad como la

carga de las aguas residuales. Dentro de estas estrategias cabe considerar desde dimensiones y secciones de los establecimientos, grado de tecnificación y variedad de productos hasta precauciones adicionales en las zonas de producción tales como pérdidas de producto por derrames, goteo o formación de espumas^{4,5}.

La DQO depende de la composición, sobre todo de su cantidad de grasa por lo que siempre resulta económicamente favorable separar las grasas utilizando trampas de grasa y si éstas aparecen junto con tensoactivos en forma emulsionada se separan por medio de flotación (separación de sustancias que sobrenadan con ayuda de finas burbujas de aire). Además, se separan sustancias proteicas en disolución coloidal. El efecto se ve reforzado cuando se agregan compuestos floculadores⁵.

El uso de tanques reguladores permite mantener un flujo constante de aguas hasta el canal de desagüe, incluso durante las horas en que no hay generación de aguas residuales. Los establecimientos que tienen tres turnos de producción llegan a necesitar tanques hasta 1,2 veces la cantidad máxima de generación de aguas residuales por día⁵.

Los tanques permiten también regular el pH y realizar la neutralización de producto microbiciada no utilizado, a fin de prevenir alteraciones de la limpieza biológica de las aguas residuales y finalmente refrigeran las aguas con soluciones limpiadoras que usualmente son vertidas sin ningún reparo a las canalizaciones.

Las metas internas de los establecimientos de producción de alimentos son principalmente la neutralización, regulación de temperatura y separación de grasas de las aguas residuales. Para un posterior tratamiento de las aguas se plantea un tratamiento aerobio y otro anaerobio, este último se propone para el tratamiento de aguas de plantas lecheras ya que ofrece la ventaja de producir biogás y menor generación de lodos. Sin embargo frente a la escasez del recurso hídrico la industria alimentaria se ve en la necesidad de reciclar y reusar el agua. Para ello se enfrenta al reto de seleccionar tecnologías que le permitan tratar sus aguas residuales de forma económica y eficiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrolló una investigación con las aguas residuales de una industria láctea de la región. Se recolectaron muestras tanto del tanque de descargas como del tanque de homogenización, este último, toma las aguas del tanque de descarga de las aguas residuales de la empresa y las mezcla. A estas se le analizaron: pH, DQO, conductividad eléctrica, grasas y aceites en los laboratorios de la Corporación Universitaria Lasallista.

Los análisis se realizaron el mismo día del muestreo, de acuerdo con los resultados se decidió que las muestras de agua para la investigación serían recolectadas sólo del tanque de homogenización por ser este el más representativo en las características fisicoquímicas del agua residual láctea.

La experimentación se llevó a cabo en la celda diseñada para la electrocoagulación de la cual se habló en el capítulo anterior sobre “Diseño y construcción de una celda prototipo de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales”.

Se realizó una prueba de tamizado consistente en la observación del comportamiento de diferentes variables fisicoquímicas en el medio acuoso recolectando información a priori que permitiera determinar los valores de corriente eléctrica, distancia entre electrodos, tiempo de exposición al tratamiento y pH que llevan a tratamientos de electrocoagulación más eficientes para ser tenidos en cuenta en el diseño experimental.

Las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron: densidad de corriente eléctrica (J), pH inicial del agua residual y tiempo de tratamiento (min); manteniendo como electrodo de sacrificio al hierro (ánodo) y como cátodo el aluminio.

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño factorial de tres factores (pH, densidad de corriente y tiempo), completamente al azar. Los niveles para cada uno de estos factores se consignan en la Tabla I. Para cada uno de los experimentos se realizaron cuatro repeticiones. Las variables de respuesta fueron el porcentaje de remoción de DQO y el de grasas y aceites. La DQO fue corregida por las interferencias de hierro.

Tabla I. Factores y niveles en el diseño experimental

Factores	Niveles		
pH	5,0	7,0	8,0
Densidad de corriente (A/m ²)	32,43	43,23	
Tiempo (min)	5	10	15

El modelo estadístico utilizado para el análisis de la información fue:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

Donde,

μ es el porcentaje medio de remoción de DQO del modelo.

α_i es el efecto del i-ésimo nivel del factor pH.

$i = 5, 7 \text{ y } 8.$

β_j es el efecto del j-ésimo nivel del factor Densidad de Corriente.

$j = 32,43 \text{ y } 43,23.$

γ_k es el efecto del k-ésimo nivel del factor Tiempo.

$k = 5, 10 \text{ y } 15.$

$(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores pH y Densidad de Corriente. $\forall i, j$

$(\alpha\gamma)_{ik}$ es el efecto de interacción entre los niveles i y k de los factores pH y Tiempo. $\forall i, k$

$(\beta\gamma)_{jk}$ es el efecto de interacción entre los niveles j y k de los factores Densidad de Corriente y Tiempo. $\forall j, k$

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ es el efecto de interacción entre los niveles i , j y k de los factores pH, Densidad de Corriente y Tiempo. $\forall i,j,k$

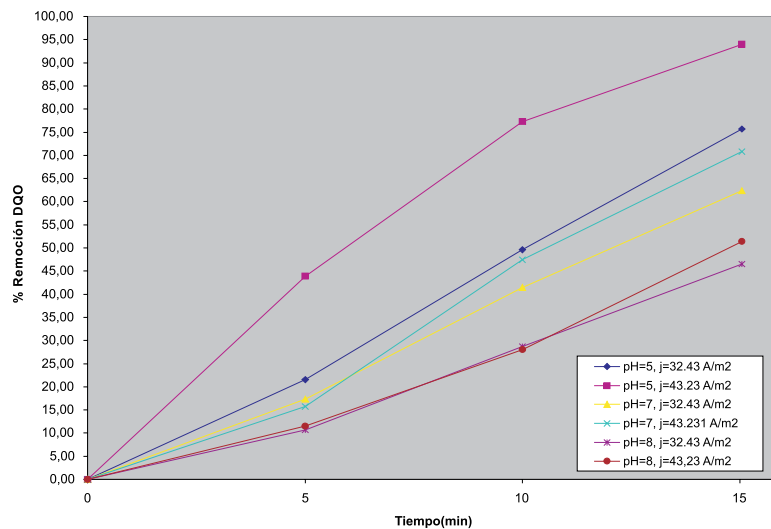
y_{ijkl} es la l -ésima observación del porcentaje de remoción de DQO observado en los niveles i , j y k de los factores pH, Densidad de Corriente y Tiempo.

ε_{ijkl} es el l -ésimo término de error aleatorio.

RESULTADOS

La Gráfica 1 muestra el porcentaje de remoción de DQO para las diferentes combinaciones de tratamientos considerados en el diseño experimental. Se observa que los mayores porcentajes de remoción de DQO se presentan a pH inicial de 5, densidad de corriente (j) de 43,23 y de 32,43 A/m² y un tiempo de proceso de 15 minutos, estas remociones son de 93,99 y 75,73 % respectivamente, lo cual es alto.

Gráfica 1. Porcentajes de remoción de DQO a las diferentes combinaciones de tratamientos.



A pH 7 se presenta un comportamiento similar al observado en el caso anterior, esto es, durante los primeros 6 minutos la diferencia entre la remoción de DQO es muy pequeña para las dos densidades de corriente. Aunque es más apreciable que la observada para pH 8, y finalmente para pH inicial 5 se observa para todos los tiempos una diferencia importante entre la remoción de DQO para las dos densidades de corriente.

A un tiempo de 15 minutos existen diferencias en los porcentajes de remoción entre el tratamiento a 32,43 y 43,23 a/m², pero estas diferencias se van reduciendo a medida que aumenta el pH. Este comportamiento se puede evidenciar más fácilmente en la Tabla 2.

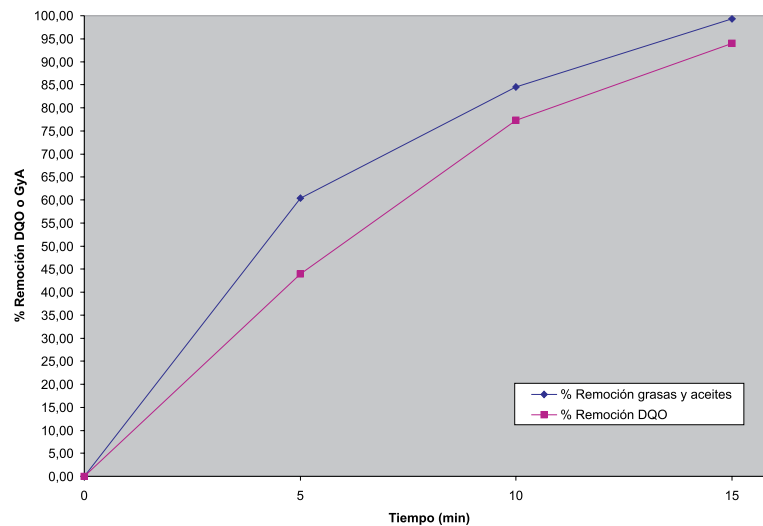
El análisis anterior sugiere que a medida que aumenta el pH inicial del agua residual, disminuye la eficiencia de la densidad de corriente en la remoción de la DQO. Este comportamiento se explica ya que las propiedades de precipitación de proteínas y materia orgánica de los componentes lácteos se presentan a pH ácidos.

Tabla 2. Variaciones del % de remoción de DQO para los diferentes pHs

pH	Tiempo (min)	% remoción de DQO a 32,43 A/m ²	% remoción de DQO a 43,23 A/m ²	Δ % remoción DQO
5	15	75,73	93,99	18,26
7	15	62,36	70,83	8,47
8	15	46,55	51,44	4,89

La Gráfica 2 muestra los porcentajes de remoción de DQO, de grasas y aceites para la combinación del ensayo que arrojó las remociones más altas de DQO, esto es pH de 5 y densidad de corriente de 43,23 A/m²; en la foto 1 se observa el estado del agua antes durante y después del tratamiento.

Gráfica 2. Remociones de DQO, grasas y aceites para pH de 5 y densidad de corriente de 43,23 A/m².



Estas dos curvas guardan una proporcionalidad debido a que las grasas y aceites hacen parte de la materia orgánica cuantificada como DQO. La curva de remoción de grasas y aceites está por encima de la remoción de DQO para todos los tiempos, lo que indica una alta eficiencia de la electrocoagulación en la eliminación de estas sustancias.

En la Tabla 3 se muestran los valores de remoción de la DQO, Grasas y aceites a diferentes tiempos.

Foto 1. Evolución de la electrocoagulación del agua residual para pH inicial de 5 y densidad de corriente de 43,23 A/m².

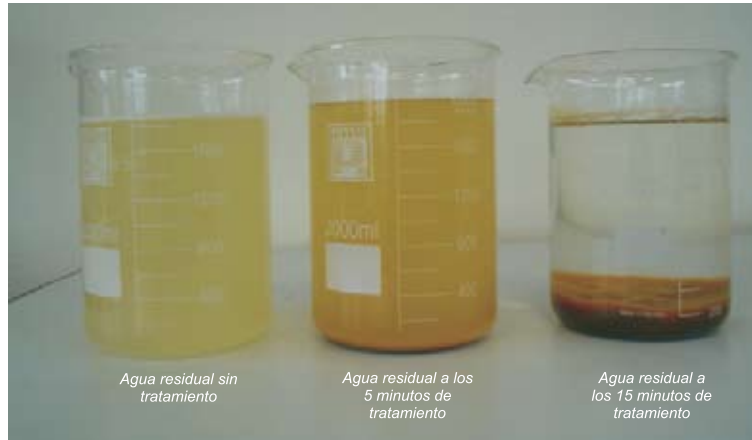


Tabla 3. Remoción de DQO, grasas y aceites para pH de 5 y densidad de corriente de 43.23 A/m²

Tiempo (min)	% Remoción DQO	% Remoción Grasas y Aceites
5	43,88	60,40
10	77,29	84,53
15	93,99	99,32

Se realizó el análisis de varianza a la información mediante el paquete estadística SAS. Se observa que el modelo estadístico propuesto explica el 98,61% de la variabilidad de la proporción de remoción de DQO, lo cual indica un gran ajuste del modelo a los datos recolectados.

Tabla 4. Resultados del análisis de varianza

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados tipo III	Media cuadrática	F	Valor de p
Densidad de corriente	1	1651,88	1651,88	151,68	<0,0001
Tiempo	2	26194,40	13097,20	1202,63	<0,0001
pH	2	11517,34	5758,67	528,78	<0,0001
Densidad corriente*Tiempo	2	51,43	25,72	2,36	0,1040
pH*Densidad de corriente	2	1574,90	787,45	72,31	<0,0001
pH*Tiempo	4	587,14	146,79	13,48	<0,0001
pH*Densidad de corriente*Tiempo	4	178,99	44,75	4,11	0,0056

En la tabla 4, las pruebas de significancia de los efectos principales y de interacción (de dos y tres factores) se observa que, excepto el efecto de interacción entre la densidad de corriente y el tiempo, todos los efectos son significativos, claro está que como la interacción de los tres factores es significativa ($p < 0,01$), se debe tener cuidado al considerar la no significancia de la interacción entre la densidad de corriente y el tiempo.

DISCUSIÓN

Los tres factores bajo estudio (pH, densidad de corriente y tiempo) tienen un efecto significativo sobre la proporción de remoción de DQO. El diseño de tres factores es bastante ajustado a los datos ($R\text{-Square} = 0,986112$). En particular se tiene como nivel óptimo del estudio cuando $\text{pH} = 5$, $\text{Tiempo} = 15$ y $\text{Densidad de Corriente} = 43,23 \text{ A/m}^2$, seguido de cualquiera de las dos medias que corresponden a $\text{pH} = 5$, $\text{Tiempo} = 10$, $\text{Densidad de Corriente} = 43,23$; o $\text{pH} = 5$, $\text{Tiempo} = 15$, $\text{Densidad} = 32,43$, estas últimas con un valor estadísticamente más bajo de la proporción de remoción de DQO.

CONCLUSIONES

La electrocoagulación se vislumbra como un tratamiento eficiente para la remoción de contaminantes en las aguas residuales industriales, específicamente en el caso de la industria láctea como sucedió en esta investigación.

REFERENCIAS

1. WIBLBRETT, Gerard. Limpieza y desinfección en la industria alimentaria. Zaragoza : Acribia, 2000. 349 p.
2. CENTRO DE ACTIVIDAD REGIONAL PARA LA PRODUCCIÓN LIMPIA (CAR/PL). Prevención de la contaminación en la industria láctea [on line]. Bogotá : Ministerio del Medio Ambiente, s.f. [Citado en mayo de 2002]. Disponible en: http://www.medioambiente.gov.ar/ciplycs/documentos/archivos/Archivo_104.pdf
3. EC.SYNNOLT. Bulletin dairy effluents. IDF (Internacional Dairy Foundation) Seminar. Killamey, Irlanda : Internacional Dairy Foundation. 1984. (IDF Document 184).
4. ALFA LAVAL. Manual de industrias lácteas. Madrid : A. Madrid Vicente, 1990. p.17.
5. AYMERICH, Sigfrido M. Conceptos para tratamiento de residuos lácteos. Costa Rica : CNP, 2000. p.12